

Reduksi Noise Akustik Secara Aktif Dengan Metode Filtered-X Least Mean Square

Resmana Lim¹, Marco Jennifer Patrick²,

¹⁾ Jurusan Teknik Elektro - Universitas Kristen Petra

²⁾ Electrical Engineering Dept. – Delft University of Technology – The Netherlands

E-mail : resmana@peter.petra.ac.id

Abstrak

Paper ini membahas implementasi metode peredaman suara secara aktif bekerja berdasarkan prinsip superposisi yang destruktif, dimana sumber suara bising (noise) dilawan dengan sumber suara anti-noise. Sumber suara anti-noise ini memiliki amplitudo yang sama besar dengan sumber noise utama, namun phasenya berbeda 180°. Akibatnya kedua sumber suara ini akan saling melemahkan. Implementasi dari proyek ini menggunakan pipa PVC yang dilengkapi dengan speaker sumber suara dan pembangkit noise. Sistem dilengkapi microphone yang digunakan sebagai sensor level suara. Untuk pemrosesan sinyal, digunakan Starter-Kit Digital Signal Processor TMS320C50 dengan menggunakan algoritma Filtered-X Least Mean Square (Filtered-X LMS) untuk mereduksi noise secara aktif. Hasil pengujian dengan berbagai variasi sinyal noise memperlihatkan hasil peredaman optimal sebesar 20 dBV.

Kata kunci: reduksi noise aktif, kendali noise, adaptif filter, metode X-LMS, TMS 320C50.

Abstract

The paper describes an implementation of an active noise canceller by using the algorithm of Filtered-X Least Mean Square (Filtered-X LMS). The system was implemented on a digital signal processor starter kit of TMS 320C50. The system was equipped with 2 speakers as sound source and noise source and microphones as sound sensors. The processor controlled the noise by generating an anti-noise sound trying to cancelled the noise so that the total noise would be reduced. The experimental results shows the system could reduce noise with the level of 20 dBV.

Keywords: Active Noise Reduction, noise control, adaptive filter, X-LMS algorithm, TMS 320C50.

Pendahuluan

Metode peredam suara secara konvensional, dilakukan secara pasif dengan menempatkan bahan-bahan peredam di sekitar sumber bising atau pada ruang yang akan diredam.

Pada proyek ini, dibuat suatu metode peredaman secara aktif dengan jalan membangkitkan suara yang berbeda phase 180° dengan sumber bising yang ada. Bila kedua sumber suara tersebut dipertemukan, maka yang terjadi ialah keduanya akan saling melemahkan.

Sebagai media simulasi, digunakan saluran pipa PVC sebagai tempat perambatan gelombang suara. Pipa ini dilengkapi dengan speaker noise, speaker anti-noise, microphone input, dan microphone error.

Dalam hal ini, speaker berfungsi sebagai sumber suara, baik noise maupun anti-noise. Sedangkan microphone berfungsi sebagai sensor penangkap sinyal suara.

Kondisi real dari jalur-jalur akustik tempat perambatan gelombang suara diimplementasikan dalam bentuk filter-filter digital. Sedangkan untuk membantu pemrosesan sinyal-sinyal digital tersebut, digunakan Digital Signal Processing (DSP) TMS320C50 [11] [12]. Algoritma yang digunakan ialah algoritma Filtered-X LMS.

Ide peredaman noise secara aktif (atau lebih dikenal dengan istilah Active Noise Control / ANC) dengan mempertemukan dua buah gelombang yang berbeda phase tetapi memiliki nilai amplitudo yang sama ini pertama kali ditemukan oleh Paul Lueg dan telah dipatenkan pada tahun 1936 [8].

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 November 2002. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 3, nomor 1, Maret 2003.

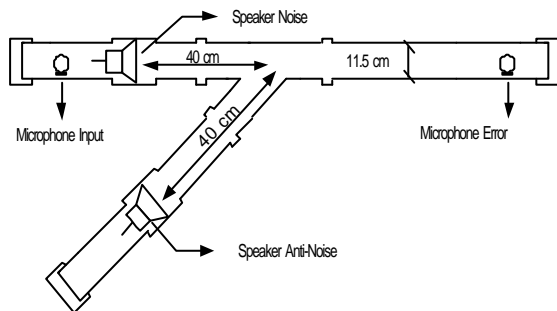
Active Noise Control

Keberhasilan sistem ANC untuk meredam suara sangat bergantung pada akurasi dari amplitudo dan sudut phase dari gelombang anti-noise yang dihasilkan oleh sistem.

Dalam penerapannya, jangkauan frekwensi noise yang dapat diredam tidaklah sebesar pada metode peredaman secara pasif. Di samping itu, sistem ANC ini dapat berfungsi secara optimal pada frekwensi rendah.

Active Noise Control ini dalam penerapannya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *single-channel* dan *multiple-channel* [8]. Contoh dari penerapan dalam *single-channel* ialah peredaman suara pada pipa saluran udara atau ventilasi, baik untuk pendingin maupun penghangat ruangan. Pipa atau saluran ini dikenal dengan nama saluran HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*). Sementara untuk penerapan pada *multiple-channel* contohnya ialah peredaman suara pada suatu ruangan terbuka. Dalam proyek ini, yang akan dicoba penerapannya ialah sistem *single channel*.

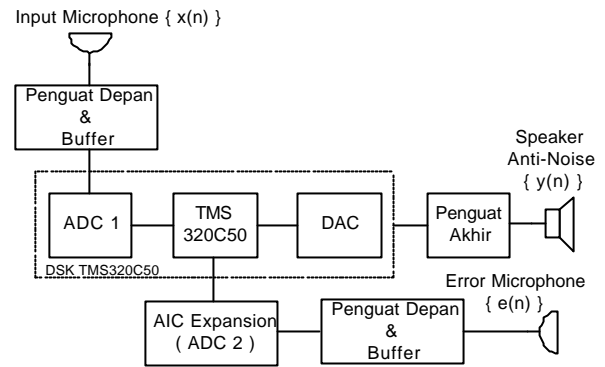
Konfigurasi sistem reduksi noise yang digunakan disini adalah mengikuti referensi [8] seperti tampak pada gambar 1.



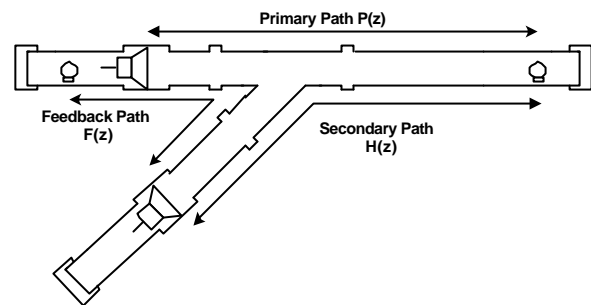
Gambar 1. Media Simulasi Berupa Pipa PVC

Sebagai sistem kendali (sistem ANC), digunakan prosesor sinyal digital TMS320C50 yang akan digunakan sebagai pengendali pada rangkaian sensor (microphone) dan penghasil suara anti noise (amplifier). Blok diagram sistem dapat dilihat pada gambar 2.

Pada dasarnya, kondisi akustik dari pipa PVC yang digunakan sebagai media simulasi direpresentasikan sebagai *primary path*, *secondary path* dan *feedback path* [8].



Gambar 2. Blok Diagram Sistem ANC



Gambar 3. Parameter Akustik

Perambatan gelombang suara pada masing-masing path tersebut dipengaruhi oleh kondisi yang ada di sekitarnya. Jenis perambatan gelombang suara pada ruang tertutup, seperti pada saluran PVC, dibagi menjadi dua macam, yaitu gelombang datar (*plane waves*) dan *cross mode wave (higher order acoustic mode propagation)* [7]. Pada gelombang datar, perambatan gelombang adalah paralel atau searah dengan pipa (saluran PVC). Tekanan akustik yang terjadi pada penampang melintang dari pipa saluran (*duct cross-section*) memiliki nilai yang konstan di sepanjang pipa. Untuk *cross mode wave*, arah perambatannya membentuk sudut terhadap dinding pipa. Selain itu tekanan akustik pada penampang melintang dari pipa tidaklah konstan, karena merupakan fungsi dari jarak pipa dan posisi sudut dari penampang melintang dari pipa.

Kemampuan gelombang akustik untuk merambat dalam silinder tertutup (saluran PVC) dipengaruhi oleh kecepatan perambatan gelombang pada medium serta frekwensi gelombang akustik tersebut.

Kecepatan perambatan gelombang suara pada medium ditentukan oleh [3]:

$$c = \sqrt{\frac{\tilde{\alpha} \cdot G \cdot T^o}{M}} \quad (1)$$

dimana :

- c = kecepatan suara
 γ = perbandingan dari suhu spesifik pada tekanan konstan dengan suhu spesifik pada volume konstan.
 = 1,4 (untuk medium udara)
 G = konstanta gas
 = $8317 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{K}$
 T^o = suhu dalam Kelvin
 = $20^\circ \text{C} + 273$
 = 293°K
 M = berat molekul dari medium
 = 29 (udara)

Jadi, dengan demikian kecepatan perambatan gelombang akustik pada udara adalah sebesar :

$$c = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8317 \cdot 293}{29}} = 343 \text{ m/dt} \quad (2)$$

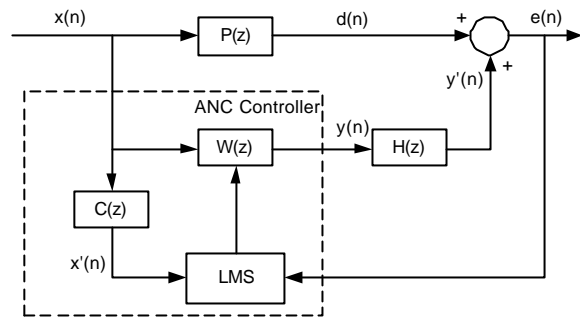
Active Noise Control hanyalah efektif bila diterapkan untuk gelombang datar dengan daerah frekwensi yang diredam adalah di bawah 1000 Hz. Hal ini berkaitan dengan kemampuan perambatan gelombang datar pada saluran berupa silinder bila nilai $k \cdot a_i < 1,8412$, dimana a_i adalah diameter dari silinder sedangkan k adalah konstanta perbandingan antara frekwensi gelombang dengan kecepatan perambatan gelombang suara pada medium [7]. Rumusnya adalah sebagai berikut :

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c_i} \right)^2 \quad (3)$$

dimana:

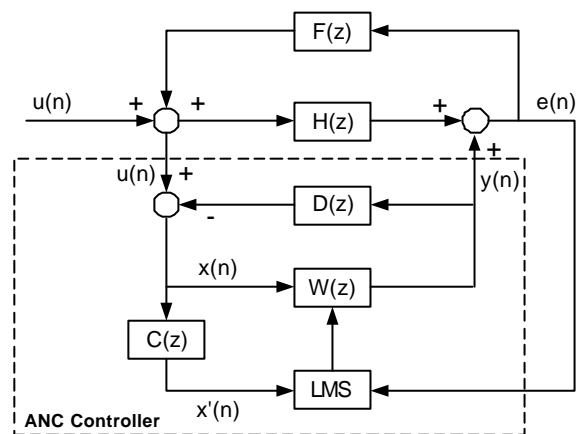
- ω = radian frekwensi
 = $2 \cdot \pi \cdot f$
 c_i = kecepatan perambatan gelombang akustik pada medium

Bilamana diambil harga $c_i = 343 \text{ m/dt}$ dan diameter silinder = 11cm (= 0.11 m) , maka nilai frekwensi maksimum yang dapat dipenuhi agar nilai $k \cdot a_i < 1,8412$ adalah kurang dari 913,741 Hz. Dengan demikian perambatan gelombang datar dapat terjadi apabila frekwensi gelombang akustik (suara) adalah kurang dari 913,741 Hz. Pada frekwensi yang lebih tinggi, akan terjadi perambatan gelombang dengan mode *cross mode wave (higher order acoustic mode propagation)*. Dengan mengacu pada gambar 3, parameter-parameter akustik yang ada pada sistem dijabarkan dalam bentuk filter-filter digital.



Gambar 4. Filter Digital Pada Sistem ANC

Pada gambar di atas [8], filter $C(z)$ merupakan filter kompensasi dari filter $H(z)$ yang merupakan representasi dari Secondary Path. Masalah lainnya yang harus diatasi dengan menambahkan filter kompensasi ialah adanya Feedback Path, $F(z)$. Feedback Path ini muncul sebagai akibat dari adanya sinyal suara yang berasal dari anti-noise speaker yang masuk pada input-microphone. Penambahan filter $D(z)$ merupakan bentuk kompensasi agar sistem ANC tetap stabil.

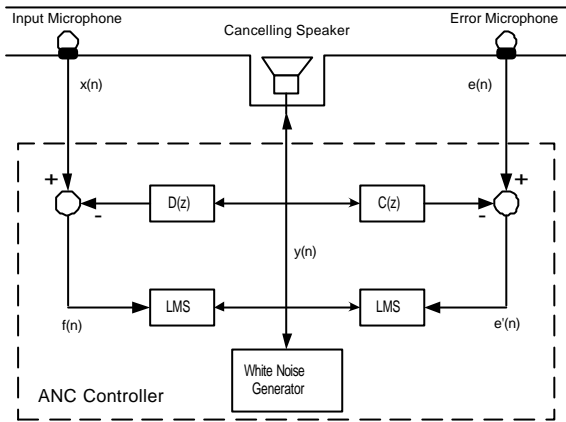


Gambar 5. Secondary Path dan Feedback Path

Filter $C(z)$ dan $D(z)$ ini pada mulanya tidak diketahui nilainya. Untuk itu sebelum sistem ANC ini dijalankan secara keseluruhan, terlebih dahulu nilai-nilai koefisien filter ini harus ditentukan. Nilai-nilai ini sepenuhnya bergantung pada kondisi akustik pada saluran pipa PVC yang digunakan sebagai media simulasi. Salah satu cara yang ditempuh untuk dapat mengetahui nilai-nilai koefisien filter tersebut adalah dengan melakukan proses training sebelum sistem ANC dioperasikan secara keseluruhan.

Proses training ini dilakukan dengan cara membangkitkan sinyal white noise pada speaker anti-noise. White noise merupakan sinyal noise

yang memiliki *power density* yang konstan pada suatu range frekwensi tertentu. Konfigurasi dari proses training ini dapat digambarkan berikut [8]:



Gambar 6. Mode Training

Sinyal White Noise yang dibangkitkan, tidak hanya dikeluarkan pada speaker anti-noise saja (cancelling speaker) akan tetapi juga dioutputkan pada filter $C(z)$ dan $D(z)$. Nilai dari kedua filter akan diupdate dengan menggunakan algoritma LMS. Proses training ini akan dijalankan beberapa detik hingga nilai-nilai $C(z)$ dan $D(z)$ ini sesuai dengan kondisi akustik sesungguhnya. Dalam hal ini $C(z)$ mewakili jalur akustik $H(z)$, sedangkan $D(z)$ mewakili jalur akustik $F(z)$.

Setelah proses training in selesai dilakukan, diharapkan koefisien filter $C(z)$ dan $D(z)$ ini sudah konvergen sehingga dapat langsung digunakan dalam proses ANC.

Dari penjelasan-penjelasan tersebut, maka dapat dirumuskan langkah-langkah kerja dari sistem peredaman noise secara aktif ini dengan menjabarkannya dalam dua langkah, yaitu *Training Mode* dan *Cancellation Mode* [8].

Algoritma pemrosesan sinyal pada Training Mode menggunakan algoritma LMS, sedangkan untuk Cancellation Mode menggunakan algoritma Filtered-X LMS.

1. Algoritma Least Mean Square (LMS)

Algoritma Least Mean Square (LMS) ini termasuk algoritma yang menggunakan operator gradien ∇ dalam proses adaptasinya. Proses adaptasi dari *tap-weight* (bobot koefisien filter) ini berlangsung secara rekursif, dimulai dengan

suatu nilai awal (*initial value*). Oleh karena itu hasil yang diperoleh akan semakin baik bila jumlah iterasinya semakin besar. Hasil akhir yang diharapkan dari proses iterasi ini ialah suatu nilai yang konvergen terhadap solusi dari metode filter Wiener. Proses rekursi yang biasa digunakan ialah *steepest descent* yang bentuknya adalah [10] :

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{1}{2} \mu [-\tilde{\mathbf{N}}(J(n))] \quad (4)$$

Untuk dapat mengembangkan perkiraan vektor gradien $\tilde{\mathbf{N}}(J(n))$, strategi yang paling tepat ialah dengan mensubstitusikan matriks korelasi \mathbf{R} dan vektor korelasi silang \mathbf{p} pada persamaan :

$$\tilde{\mathbf{N}}(J(n)) = -2\mathbf{p} + 2\mathbf{R}\mathbf{w}(n) \quad (5)$$

Pilihan estimator yang paling sederhana untuk \mathbf{R} dan \mathbf{p} adalah dengan menggunakan perkiraan, berdasarkan pada besaran sampel vektor tap input $\{\mathbf{u}(n)\}$ dan respon yang diinginkan $\{d(n)\}$, seperti yang ditentukan oleh :

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(n) &= \mathbf{u}(n) \mathbf{u}^H(n) \\ \mathbf{p}(n) &= \mathbf{u}(n) d^*(n) \end{aligned} \quad (6)$$

Parameter H tersebut menyatakan nilai matriks Hermitian (kompleks – conjugate). Untuk nilai vektor gradien, diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (6) ke dalam persamaan (5) :

$$\tilde{\mathbf{N}}(J(n)) = -2 \mathbf{u}(n) d^*(n) + 2 \mathbf{u}(n) \mathbf{u}^H(n) \mathbf{w}(n) \quad (7)$$

Setelah memperoleh nilai dari masing-masing parameter, maka dapat ditentukan suatu nilai update dari tap-weight (bobot dari koefisien filter) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{u}(n) [d^*(n) - \mathbf{u}^H(n) \mathbf{w}(n)] \quad (8)$$

Dari keseluruhan rumus yang diturunkan, maka untuk algoritma LMS dapat disimpulkan sebagai berikut :

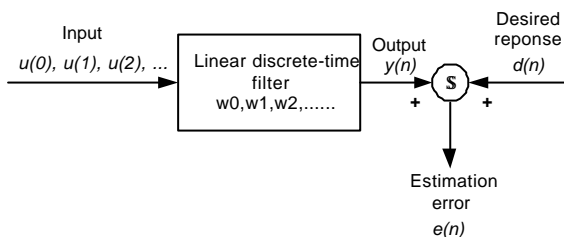
- Output filter : $y(n) = \mathbf{w}^H(n) \mathbf{u}(n)$
- Error estimasi: $e(n) = d(n) - y(n)$
- Adaptasi : $\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{u}(n) e^*(n)$
tap-weight (9)

Algoritma LMS ini tidak memerlukan proses perhitungan yang rumit karena tidak membutuhkan perhitungan fungsi korelasi maupun perhitungan invers matriks. Sifat-sifat perhitungan yang sederhana ini akan dapat dengan mudah diterapkan dalam bentuk program komputer. Karena kemudahannya inilah algoritma LMS ini menjadi salah satu standard dan paling

sering digunakan dalam perhitungan filter adaptif.

2 Algoritma Filtered-X LMS

Untuk menerapkan algoritma LMS pada sistem Active Noise Control, diperlukan sedikit modifikasi dari persamaan-persamaan algoritma LMS. Pada algoritma LMS, sinyal estimasi error $e(n)$ diperoleh melalui proses pengurangan antara sinyal desired response $d(n)$ dan output $y(n)$. Sedangkan pada Active Noise Control, sinyal estimasi error ini diperoleh dengan menjumlahkan sinyal desired response $d(n)$ dengan sinyal output $y(n)$.



Gambar 7. Algoritma Filtered-X LMS

Dengan mengacu pada penurunan-penurunan rumus yang telah dilakukan pada algoritma LMS, sistem pada gambar (7) memiliki nilai parameter-parameter sebagai berikut :

$$e(n) = d(n) + y(n) \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{N}}(J(n)) = 2 \mathbf{u}(n) \mathbf{d}^*(n) + 2 \mathbf{u}(n) \mathbf{u}^H(n) \mathbf{w}(n) \quad (11)$$

Dengan menggunakan rumus *Steepest Descent* (persamaan 4), diperoleh nilai update dari filter $\mathbf{w}(n)$:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{u}(n)e(n) \quad (12)$$

Rumus ini adalah rumus dasar yang akan digunakan dalam sistem Active Noise Control.

Pada gambar (4), sinyal input dilambangkan sebagai $x(n)$. Oleh karena itu, rumus (12) dapat diubah menjadi :

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}'(n)e(n) \quad (13)$$

Dengan adanya proses pemfilteran input $x(z)$ oleh filter $C(z)$, maka algoritma ini diberi nama algoritma Filtered-X LMS.

Sistem Perangkat Lunak

Sebelum dibuat suatu program implementasi dari algoritma Filtered-X LMS, terlebih dahulu dijabarkan rumus-rumus yang akan digunakan

pada masing-masing mode. Karena sebagaimana telah disebutkan pada bagian sebelumnya, implementasi sistem ANC dibagi dalam dua langkah, yaitu Training Mode dan Cancellation Mode.

(a) Training Mode (lihat gambar 6)

- Sinyal white noise, $y(n)$ dibangkitkan melalui speaker anti-noise
- Nilai $y(n)$ diterima oleh input microphone dan error microphone sebagai $x(n)$ dan $e(n)$. Menghitung nilai $e'(n)$ dan $f(n)$

$$e'(n) = e(n) - \sum_{i=0}^{M-1} c_i(n) \cdot y(n-i) \quad (14)$$

$$f(n) = x(n) - \sum_{j=0}^{L-1} d_j(n) \cdot y(n-j)$$

- Mengupdate nilai koefisien $C(z)$ dan $D(z)$ dengan menggunakan algoritma LMS

$$c_i(n+1) = c_i(n) + \mu e'(n) y(n-i), \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (15)$$

$$d_j(n+1) = d_j(n) + \mu f(n) y(n-j), \quad j = 0, 1, \dots, M-1$$

- Mengulangi Training Mode ini selama beberapa detik hingga nilai $C(z)$ dan $D(z)$ konvergen

(b) Cancellation Mode (lihat gambar 5)

- Nilai $u(n)$ dan $e(n)$ diterima oleh input microphone dan error microphone
- Menghitung nilai $x(n)$

$$x(n) = u(n) - \sum_{j=0}^{L-1} d_j \cdot y(n-j) \quad (16)$$

- Menghitung nilai $y(n)$

$$y(n) = \sum_{i=1}^{N-1} w_i(n) \cdot x(n-i) \quad (17)$$

- Nilai $y(n)$ yang diperoleh dikeluarkan pada speaker anti-noise untuk meredam suara dari sumber noise utama.
- Menghitung nilai $x'(n)$

$$x'(n) = \sum_{i=0}^{M-1} c_i \cdot x(n-i) \quad (18)$$

- Mengupdate nilai koefisien $W(z)$ dengan menggunakan algoritma FXLMS.

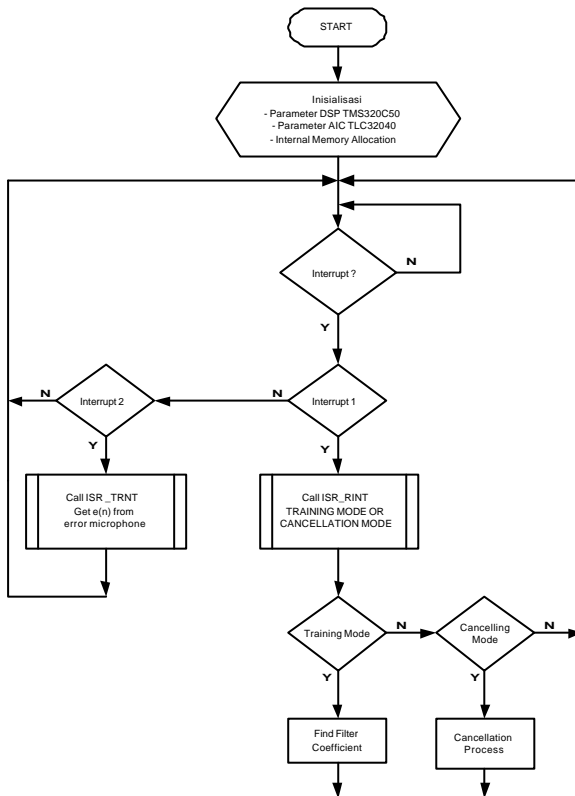
$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu e(n) x(n-i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

- Mengulangi langkah awal dari cancellation mode untuk iterasi berikutnya.

Setelah langkah-langkah tersebut dijabarkan, maka dapat dibuat flowchart dari program. Flowchart dari sistem ANC secara umum seperti terlihat pada gambar berikut.

Alur program utama, seperti tampak pada gambar (8), menggunakan interrupt dalam pemrosesan datanya. Bilamana interrupt 1 terjadi maka program akan melakukan proses Active

Noise Control. Proses ini sendiri terbagi menjadi 2 bagian, yaitu Training Mode dan Cancellation Mode. Pada Training Mode, dilakukan proses pencarian koefisien secondary path $\{C(z)\}$ dan feedback path $\{D(z)\}$. Sedangkan pada Cancellation Mode, dilakukan proses penghitungan sinyal anti-noise. Interrupt 2 dilakukan untuk pengambilan data berupa sinyal ditangkap oleh error microphone.



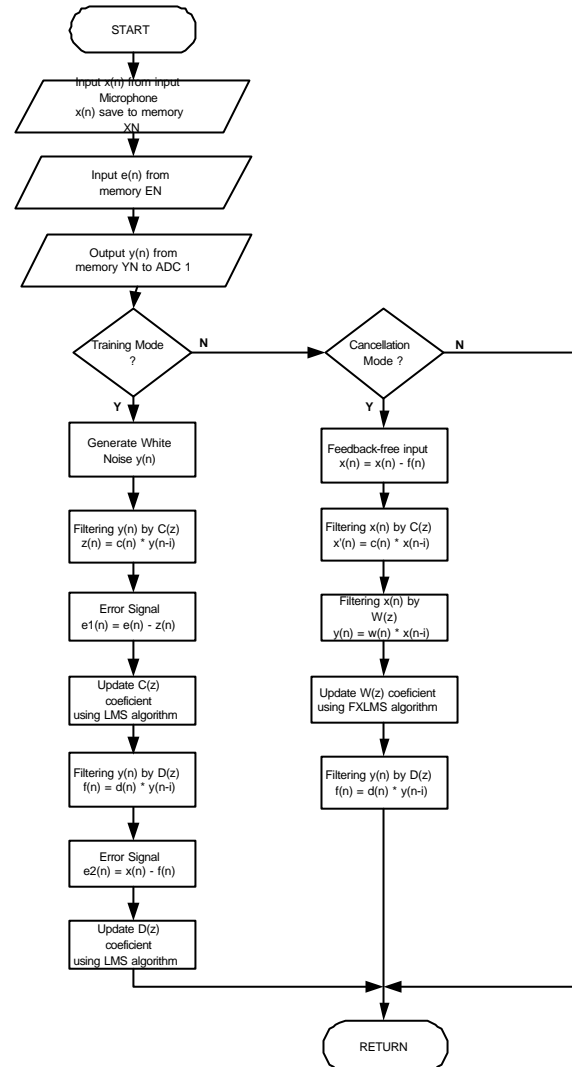
Gambar 8. Flowchart Program Utama

Proses yang terjadi pada ISR 1 dan ISR 2 dapat dilihat pada flowchart gambar (8).

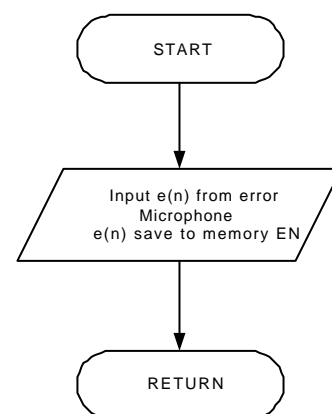
Sesuai dengan frekwensi sampling yang ditetapkan, maka interrupt ini akan terjadi setiap periode $1/10 \text{ kHz} = 100 \mu\text{s}$. Interrupt 1 dan interrupt 2 akan berjalan secara bergantian dimana interrupt 1 memegang prioritas tertinggi. Bila terjadi 2 buah interrupt secara bersamaan, interrupt yang prioritasnya lebih tinggi akan dilayani terlebih dahulu, sementara interrupt yang lainnya ditunda (*pending*). Interrupt 2 akan dilayani setelah interrupt 1 selesai.

Implementasi algoritma LMS dan Filtered-X LMS sangat ditunjang oleh kemampuan processor TMS320C50 yang memiliki instruksi-instruksi yang spesifik yang biasa digunakan dalam proses pengolahan sinyal. Di samping itu,

processor TMS320C50 ini juga memiliki kemampuan "Block Repeat" yang dapat mempercepat dan menghemat waktu dalam pemrosesan sinyal. Gambar (11) merupakan contoh dari implementasi algoritma LMS pada proses Training Mode untuk filter $C(z)$:



Gambar 9. Flowchart ISR_RINT



Gambar 10. Flowchart ISR_TRNT

CN1:	LT	ZN
	MPY	#VMU
	PAC	
	ADD	#ONE,15
	SACH	ZN
	LACL	#63
	SAMM	BRCR
	LAR	AR1,#AYE ; AR1 pointing to y(n-N+1)
	LAR	AR2,#ADCE ; AR2 pointing to cN-1(n)
	LDP	#ZN
	LT	ZN ; T = mu*e1(n)
	MAR	*,AR1
	MPY	*,AR2 ; P = mu*e1(n)*y(n-i)
;*		
	RPTB	LOOP1 - 1
NXT_C	ZALR	*,AR1
	MPYA	*,AR2 ; ci(n+1) = ci(n) + P
		; P = mu*e1(n)*y(n-i) for next i
		; store ci(n+1)
LOOP1	SACH	*+
	ZALR	*,AR1
	APAC	
	SACH	*+

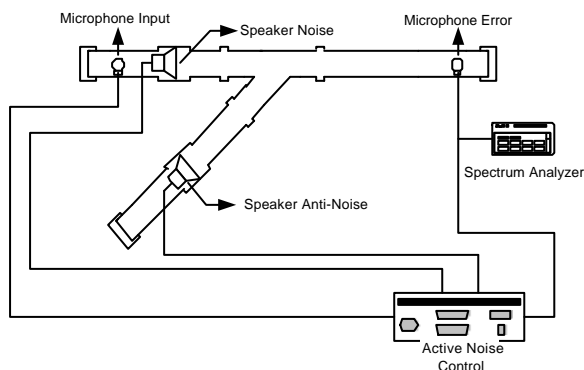
Gambar 11. Implementasi Algoritma LMS.

Pengujian Sistem

Pengujian sistem ANC ini dilakukan dengan menggunakan sinyal noise berupa gelombang sinus yang diperoleh dari function generator. Konfigurasi uji yang dipakai adalah seperti gambar (12). Pengujian ini dilakukan dengan mengubah-ubah frekwensi input dan parameter-parameter dari filter digital. Hasil keluaran (output) dari sistem ini akan diamati pada FFT Spectrum Analyzer, yang dilengkapi dengan kemampuan untuk menyimpan data pada diskette. Data ini selanjutnya dapat diolah dan ditampilkan pada komputer dalam bentuk grafik. Secara garis besar, pengujian yang akan dilakukan meliputi:

- Pengujian variasi step size algoritma FXLMS
- Pengujian variasi frekwensi noise (single frekwensi input)
- Pengujian variasi panjang orde filter
- Pengujian input multiple frekwensi

Dimana konfigurasi pengujian digambarkan berikut ini:



Gambar 12. Konfigurasi Pengujian

1. Pengujian Variasi Step Size Algoritma FXLMS

Disini digunakan variasi step-size mulai dari 64 sampai dengan 352, dengan sumber noise 569 Hz. Tabel 1 menunjukkan hasil yang diperoleh, disini terlihat reduksi noise tertinggi didapat pada step size = 320. Tabel 2 Memberikan hasil reduksi noise pada berbagai frekwensi noise mulai dari 321 – 569 Hz.

Tabel 1. Variasi Step Size Dengan Frekwensi 569 Hz

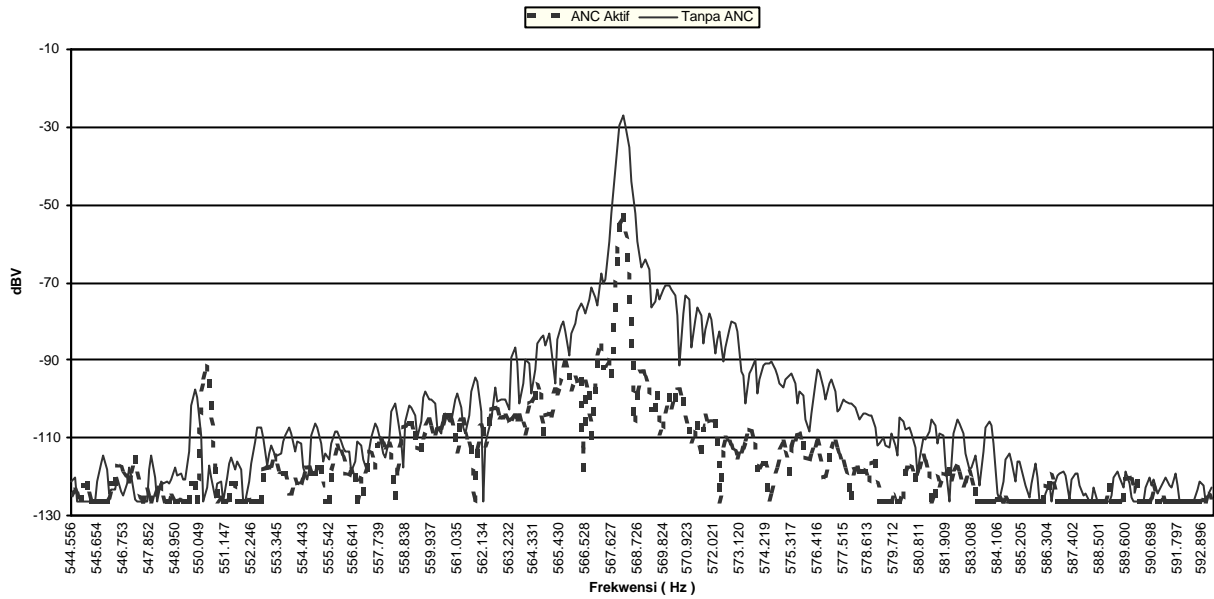
Step Size	ANC Aktif (dBV)	Tanpa ANC (dBV)	Reduksi (dBV)
64	-46.19	-22.97	23.22
96	-55.55	-24.18	31.37
128	-51.39	-24.24	27.15
160	-54.31	-24.36	29.95
192	-56.31	-24.49	31.82
224	-58.47	-24.50	33.97
256	-60.72	-24.46	36.26
288	-61.83	-24.55	37.28
320	-63.70	-24.68	39.02
352	-63.63	-25.22	38.41

Tabel 2. Rata-Rata Reduksi (dBV) Untuk Variasi Step Size

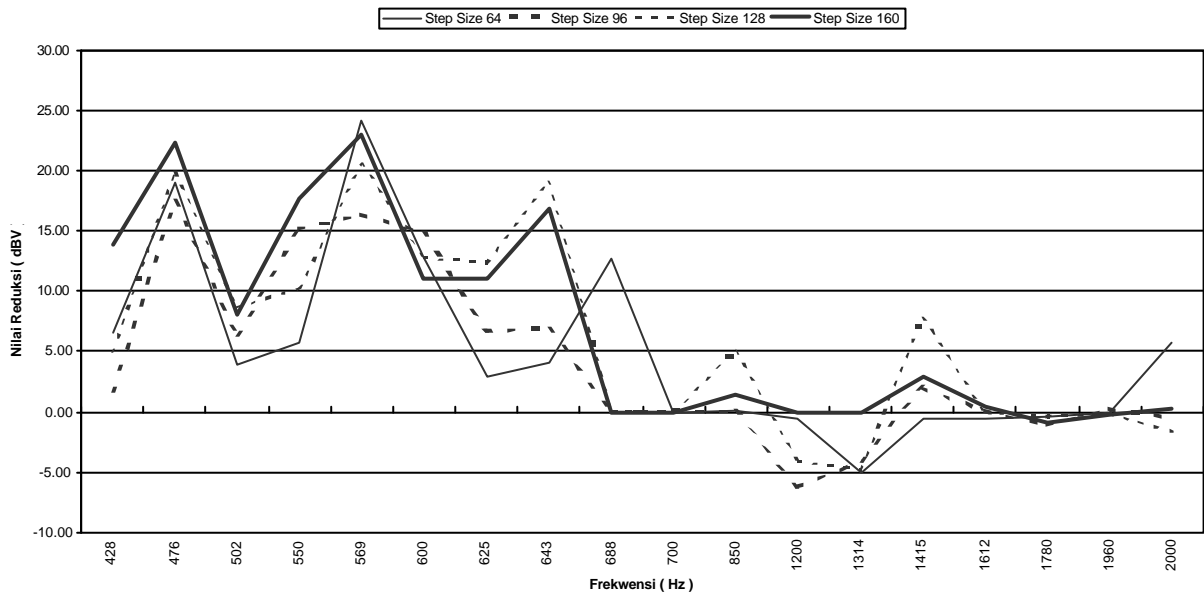
Step Size	Reduksi Pada 321 Hz	Reduksi Pada 429 Hz	Reduksi Pada 643 Hz	Reduksi Pada 569 Hz	Rata-Rata Reduksi
64	0.06	13.76	8.06	23.22	11.28
96	0.10	11.96	11.82	31.37	13.81
128	0.13	12.78	14.67	27.15	13.68
160	0.29	18.70	19.89	29.95	17.21
192	0.09	15.27	19.07	31.82	16.56
224	0.09	19.77	21.71	33.97	18.89
256	0.09	20.53	23.28	36.26	20.04
288	0.20	22.66	24.50	37.28	21.16
320	0.12	21.95	26.51	39.02	21.90
352	0.10	23.20	28.81	38.41	22.63

2. Pengujian Variasi Frekwensi Noise

Pada pengujian ini, dibangkitkan sinyal noise dengan variasi frekwensi mulai dari 428-643 Hz. Sistem ANC bekerja untuk mereduksi noise dengan hasil yang ditunjukkan pada tabel 3. Disini terlihat bahwa reduksi maksimal terjadi pada frekuensi 569 Hz. Hasil spektrum tampak pada gambar (13), disini terlihat bahwa terjadi reduksi noise sekitar 21 dBV untuk noise 569 Hz.



Gambar 13. Spectrum Hasil Peredaman Noise Pada Frekwensi 569 Hz



Gambar 14. Grafik Nilai Reduksi Terhadap Variasi Frekwensi

Tabel 3. Rata-Rata Reduksi (dBV) Untuk Variasi Frekwensi

Frekwensi (Hz)	Reduksi (dBV) Step Size 64	Reduksi (dBV) Step Size 96	Reduksi (dBV) Step Size 128	Reduksi (dBV) Step Size 160	Rata Rata Reduksi (dBV)
428	6.55	1.68	4.97	13.92	6.78
476	19.02	17.47	19.85	22.35	19.67
502	3.81	6.37	8.63	8.05	6.72
550	5.70	15.12	10.25	17.68	12.19
569	24.20	16.33	20.57	23.01	21.03
600	12.80	14.81	12.78	11.09	12.87
625	2.89	6.72	12.39	10.96	8.24
643	4.03	6.92	19.06	16.86	11.72

3. Pengujian Variasi Panjang Orde Filter

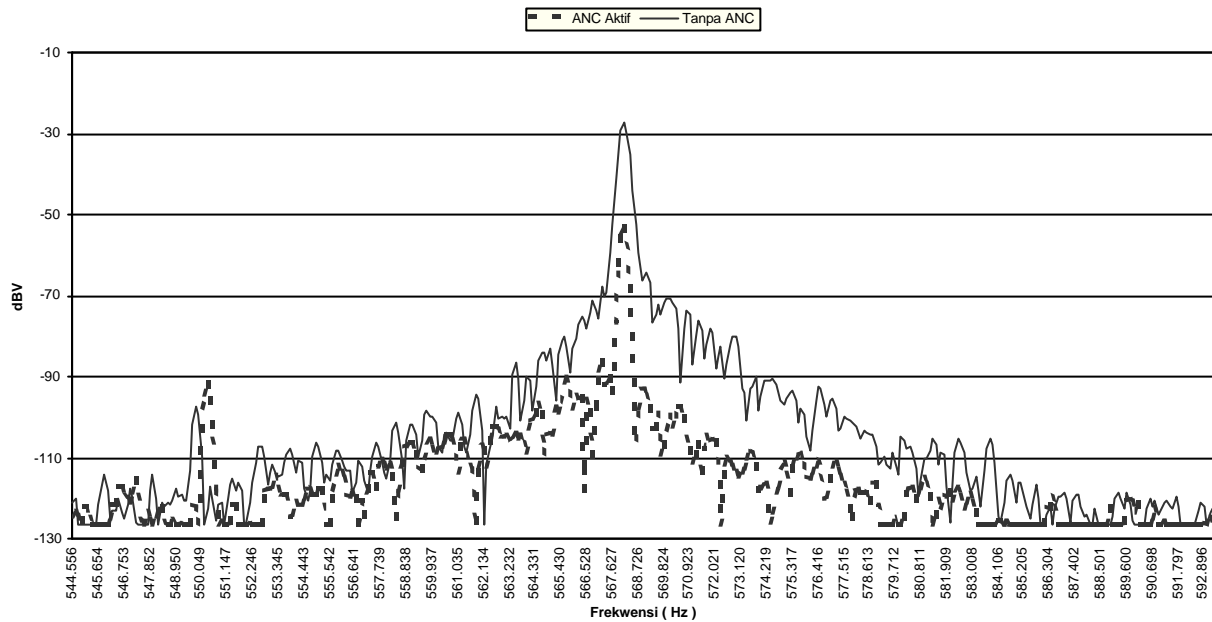
Sistem juga diuji dengan variasi panjang orde filter. Disini digunakan frekwensi noise pada 569 Hz dengan step-size=64. Hasilnya tampak pada tabel 4 & 5, disini tampak bahwa orde filter=65 memberikan nilai optimum dengan hasil reduksi noise mencapai 44.96 dBV.

Tabel 4. Variasi Orde Filter Dengan Frekwensi Noise 569 Hz dan Step Size 64

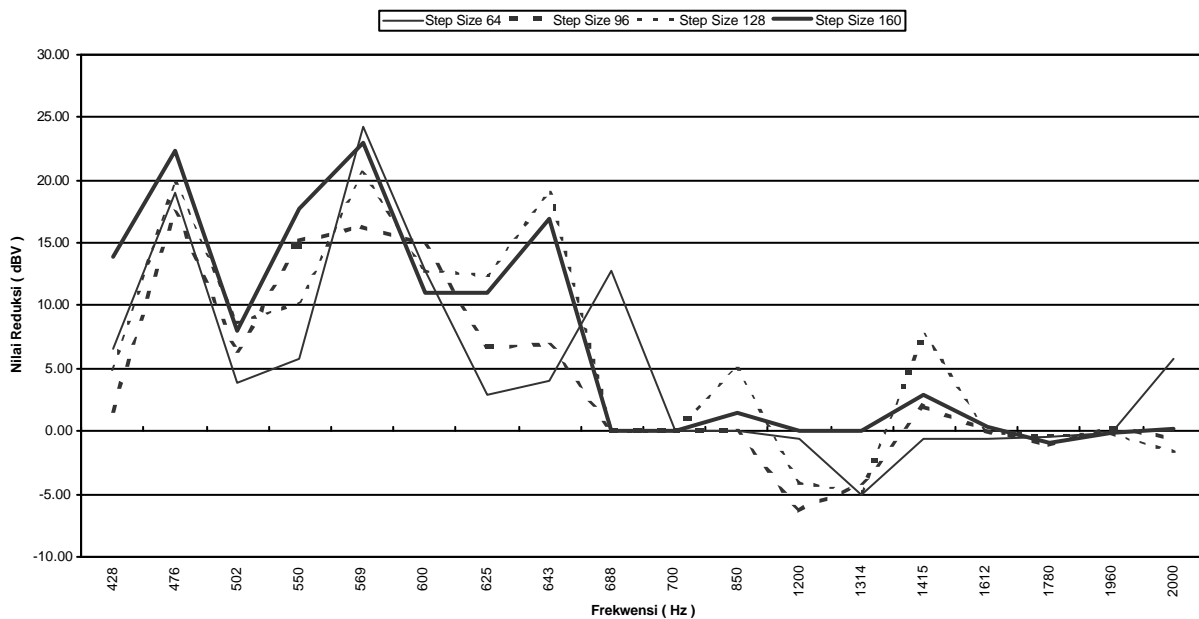
Orde Filter	ANC Aktif (dBV)	Tanpa ANC (dBV)	Reduksi (dBV)
4	-22.68	-23.79	-1.11
8	-23.64	-23.79	-0.15
16	-24.78	-23.68	1.10
32	-45.88	-23.68	22.20
64	-65.38	-23.65	41.73
128	-24.32	-23.59	0.73

Tabel 5. Variasi Orde Filter (2) Dengan Frekwensi Noise 569 Hz dan Step Size 64

Orde Filter	ANC Aktif (dBV)	Tanpa ANC (dBV)	Reduksi (dBV)
62	-29.67	-23.52	6.15
63	-55.77	-23.40	32.37
64	-46.65	-23.35	23.30
65	-68.29	-23.33	44.96
66	-44.26	-23.25	21.01
67	-55.14	-23.14	32.00



Gambar 13. Spectrum Hasil Peredaman Noise Pada Frekwensi 569 Hz



Gambar 14. Grafik Nilai Reduksi Terhadap Variasi Frekwensi

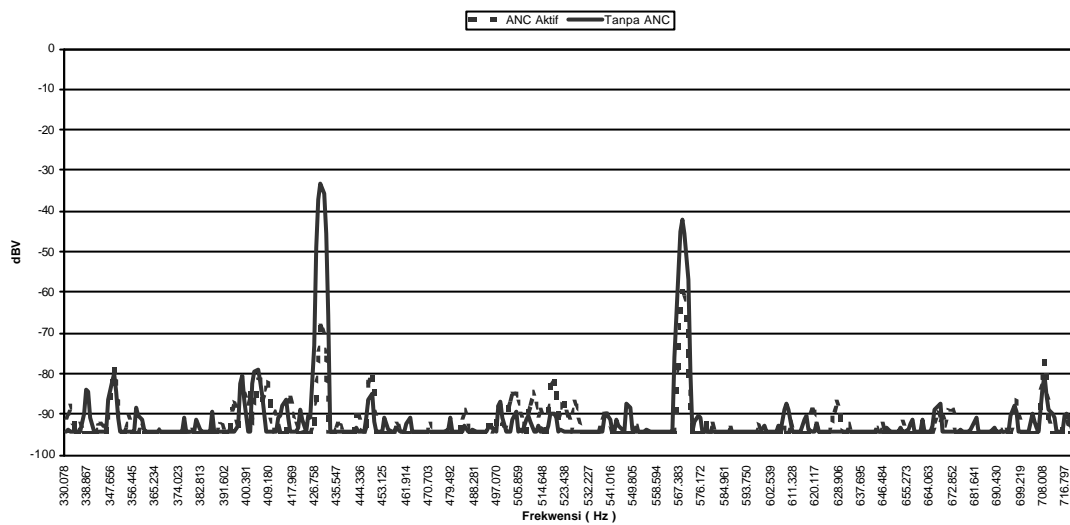
4. Pengujian Variasi Level Input Noise

Pengaruh variasi besarnya level sinyal input noise juga diujikan pada sistem. Disini digunakan variasi level noise mulai dari -1.11 dBV sampai dengan 11.33 dBV. Dari tabel 6 terlihat bahwa sistem menunjukkan reduksi noise maksimal pada level input noise= 11.33 dBV.

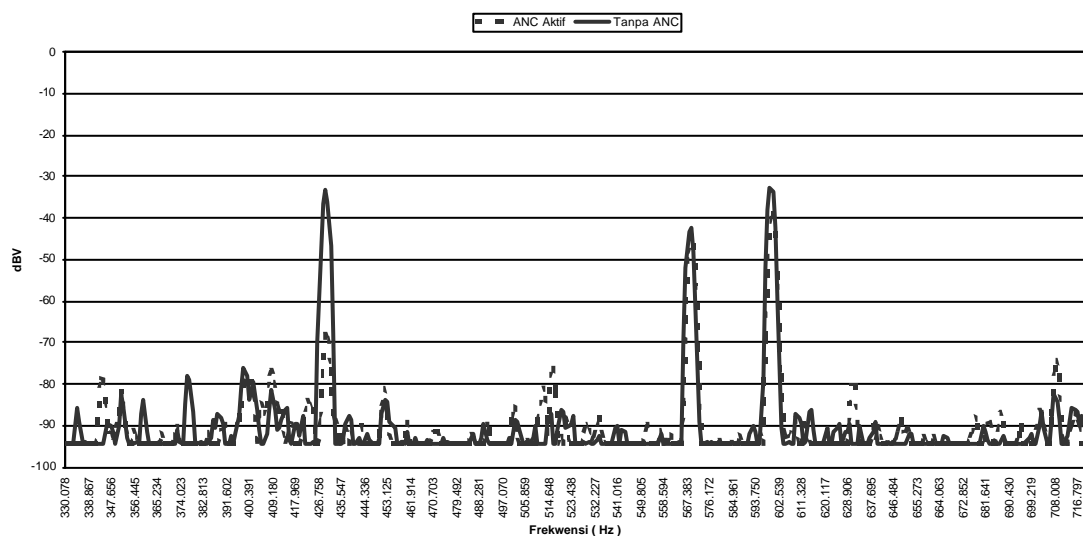
Tabel 6. Reduksi Noise terhadap variasi Level Input Noise

FREK. (Hz)	INPUT -1.11 dBV	INPUT 2.16 dBV	INPUT 4.71 dBV	INPUT 5.63 dBV	INPUT 11.33 dBV
428.00	2.49	12.73	13.24	16.22	33.86
502.00	6.05	12.54	20.46	22.60	23.15
550.00	1.53	4.41	6.58	7.80	16.84
569.00	1.19	0.88	1.95	3.20	13.34
600.00	1.39	9.32	11.87	11.33	21.52

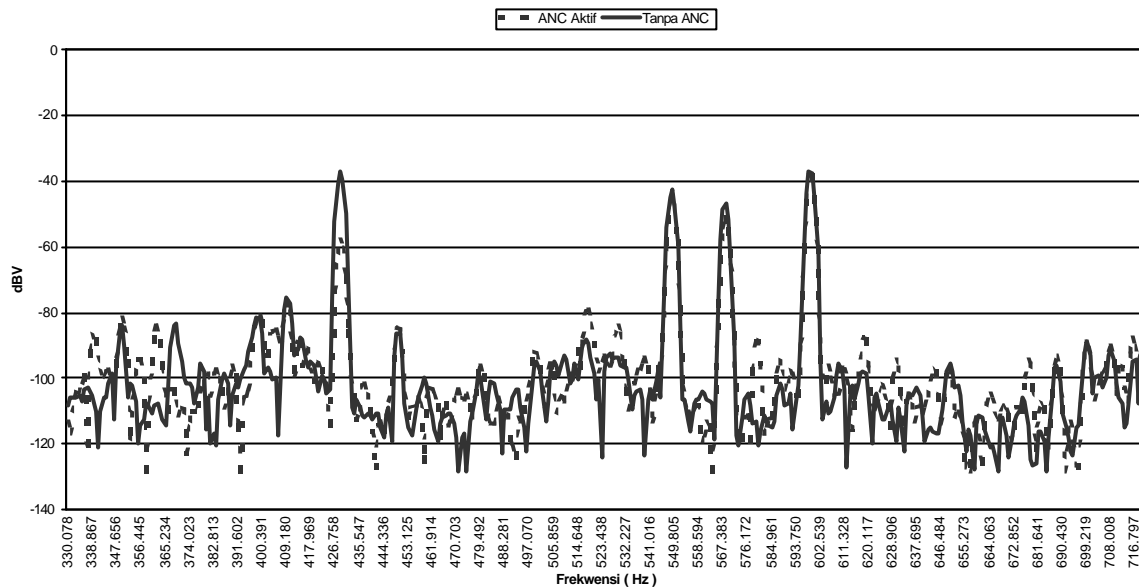
5. Pengujian Input Multiple Frekwensi



Gambar 15.
Ket.: Frekwensi Input = 428 Hz & 569 Hz, Step Size = 160
Hasil Reduksi = 35.7 dBV & 11.2 dBV



Gambar 16.
Ket. : Frekwensi Input = 428 Hz, 569 Hz & 600 Hz, Step Size = 160
Hasil Reduksi = 27.3 dBV, 2.8 dBV & 6.1 dBV



Gambar 17.

Ket.: Frekwensi Input = 428 Hz, 550 Hz, 569 Hz & 600 Hz, Step Size = 160

Hasil Reduksi = 21.8 dBV, 1.5 dBV, 6.2 dBV & 1.9 dBV

Gambar 15, 16 dan 17 adalah hasil spektrum reduksi sinyal noise multi frekwensi. Disini dibangkitkan sinyal noise dengan frekuensi sebanyak 2 buah, lantas kemudian sistem ANC dijalankan untuk mencoba mereduksi noise tersebut. Gambar 15 menunjukkan spektrum noise sebelum dan sesudah ANC dijalankan, yang mana tampak bahwa terjadi reduksi sebesar 35.7 dBV pada noise 428 Hz dan reduksi 11.2 dBV pada noise 569 Hz.

Kesimpulan

- Penerapan peredaman noise secara aktif (Active Noise Control) ini efektif untuk frekwensi rendah untuk sinyal noise narrow-band. Dalam implemementasi pada tugas akhir ini, frekwensi yang optimal yang dapat diredam ialah sinyal dengan frekwensi-frekwensi : Frekwensi-frekwensi sinyal noise yang dapat diredam bernilai 428, 476, 502, 550, 569, 600, 625 dan 643 Hz. Dari nilai-nilai tersebut, diperoleh nilai reduksi yang optimal sebesar 21.03 dBV, pada frekwensi noise 569 Hz. Dengan demikian, hubungan antara frekwensi noise (frekwensi input) terhadap reduksi noise tidak linier. Hal ini disebabkan karena kemampuan ANC untuk meredam noise pada suatu range frekwensi bergantung pada parameter akustik yang ada (sifat-sifat perambatan gelombang suara) dan diameter dari pipa PVC yang digunakan sebagai media simulasi.

- Algoritma Filtered-X LMS cukup efektif untuk diterapkan dalam aplikasi peredaman noise untuk sumber noise dengan frekwensi narrow-band.
- Kemampuan Digital Signal Processor TMS320C50 cukup memadai bila digunakan untuk aplikasi yang bersifat real-time, seperti halnya aplikasi peredaman noise ini.
- Dengan memperbesar nilai step size dari persamaan yang digunakan untuk mengupdate koefisien filter, akan membuat konvergensi koefisien filter lebih cepat tercapai. Pengaruhnya pada sistem ANC ini ialah hasil reduksi yang dicapai cukup besar. Akan tetapi sebagai kompensasinya, sistem akan menjadi relatif sulit mencapai kestabilan. Dari hasil percobaan diperoleh nilai step size yang optimal sebesar 64 dengan nilai reduksi rata-rata sebesar 11,28 dBV.
- Jumlah orde filter digital sangat berpengaruh pada kemampuan sistem untuk mempresentasikan kondisi sesungguhnya dari sistem. Semakin besar orde filter, semakin real pendekatan dari filter digital terhadap kondisi sesungguhnya. Akan tetapi sistem ANC memiliki satu nilai orde filter yang optimum dimana sistem ANC akan dapat berfungsi secara optimal. Dari hasil percobaan, diperoleh orde yang optimal sebesar 65 dengan nilai reduksi rata-rata 44,96 dBV.

Daftar Pustaka

- [1] Andreas Antoniou. Digital Filters, Analysis, Design, and Applications 2nd Ed. McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [2] Burgess, J.C. Active Adaptive Sound Control in a Duct : A Computer Simulation. J. Acoust Soc. Am., Vol. 70, No. 3, Sept. 1981, p.715-726
- [3] Conrad J., Hemond, Jr. Engineering Acoustics & Noise Control. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1983.
- [4] Bambang Riyanto, Stephen Prajna,. Agung Harsoyo, Pengembangan dan Implementasi Kendali Bising Aktif Dengan Konfigurasi Umpan Balik Menggunakan DSP, Lokakarya, Seminar & Pameran Sistem Kendali di Industri. Bandung: 1998.
- [5] Elliot S.J., P.A. Nelson. Active Noise Control IEEE Signal Processing Magazine, vol. 10 no. 4. p.12 – 35, 1993.
- [6] Morgan, D.R. An Analysis of Multiple Correlation Cancellation Loops with a Filter in the Auxiliary Path. IEEE Trans. on ASSP, Vol. ASSP-28, No.4, August, 1980, p. 454-467.
- [7] Norton, M.P.. Fundamental of Noise and Vibration Analysis for Engineers. Cambridge: University Press.
- [8] Sen M. Kuo, Ph.D., Issa Panahi, Ph.D., Kai M. Chung, Tom Horner, Mark Nadeski, Jasin Chyan. Desing of Active Noise Contol Systems With the TMS320 Family. Texas Instruments, 1996.
- [9] Sen M. Kuo, C. Chen. Implementation of Adaptive Filters with the TMS320C25 or the TMS320C30, Digital Signal Processing Applications With the TMS320 Family, vol.3. New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [10] Simon Haykin. Adaptive Filter Theory 2^d Ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [11] TMS320C5X DSP Starter Kit User's Guide. Houston : Texas Instruments Inc. 1994.
- [12] TMS320C5X User's Guide. Houston: Texas Instruments Inc. 1994.